

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“Київський політехнічний інститут”
Кафедра електронних приладів та пристроїв

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ШОДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ
РОБОТИ З ДИСЦИПЛІНИ “ЕЛЕКТРОНІКА ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИХ
СИСТЕМ. ЕЛЕКТРОННА ТА ІОННА ОПТИКА”

для студентів спеціальності
6.05080201 «Електронні прилади та пристрої»
усіх форм навчання

Київ-2014

Електроніка перетворювальних систем. Електронна та іонна оптика [Текст]: метод. рекомендації щодо викон. курсової роботи для студ. спеціальності 6.05080201 «Електронні прилади та пристрої» усіх форм навчання / Уклад. О.В.Терлецький. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 27 с.

*Гриф надано Методичною радою факультету електроніки НТУУ «КПІ»
(Протокол № від 26.05. 2014 р.)*

Навчальне видання

Електронна та іонна оптика

Методичні рекомендації

щодо виконання курсової роботи

для студентів спеціальності

6.05080201 «Електронні прилади та пристрої»

усіх форм навчання

Укладач: *О.В. Терлецький, канд. техн. наук., доц.*

Відповідальний редактор: *Л.Д. Писаренко, д-р. техн. наук., проф.*

Рецензент: *В.В. Пілінський, канд. техн. наук., проф.*

ЗМІСТ

| Вступ | Стор. |
|---|-------|
| 1. Дослідження руху електрона в осі-симетричних електростатичних полях. | 4 |
| 1.1 Теоретичні положення. | 4 |
| 1.1.1. Розподіл потенціалу в осі-симетричному електричному полі. | 4 |
| 1.1.2. Рух параксіальних електронів в осі-симетричному електричному полі. | 6 |
| 1.2. Програмне забезпечення курсової роботи. | 8 |
| 1.3. Програма курсової роботи. | 10 |
| 1.3.1 Розрахунок електростатичного поля електронної лінзи за методом кінцевих різниць. | 10 |
| 1.3.2. Дослідження руху електрона в осі – симетричних електростатичних полях електронних лінз. | 12 |
| 1.3.3. Контрольні питання. | 17 |
| 1.3.4. Зміст протоколу роботи. | 17 |
| 2. Дослідження процесів руху електрона в осі-симетричному полі магнітних електронних лінз. | 17 |
| 2.1. Загальні положення. | 18 |
| 2.2. Рух електрона в однорідному осі-симетричному магнітному полі. | 20 |
| 2.3. Рух електрона в неоднорідному аксіально-симетричному магнітному полі. | 21 |
| 2.4. Програмне забезпечення. | 22 |
| 2.5. Дослідження руху електрона в однорідному аксіально-симетричному полі соленоїда. | 23 |
| 2.6. Дослідження руху електрона в неоднорідному аксіально-симетричному полі короткої магнітної лінзи. | 24 |
| 2.7. Контрольні питання. | 26 |
| 2.8. Зміст протоколу роботи. | 26 |
| Література | 26 |

ВСТУП

Електронна та іонна оптика є основою для теоретичної розробки та конструювання різноманітних приладів та пристроїв, принцип дії яких заснований на формуванні потоків заряджених частинок та взаємодії їх з поверхнею твердого тіла. Крім того, знання основ електронної та іонної оптики дуже корисні фахівцям, які використовують або обслуговують електронно-променеві прилади та пристрої. У теоретичній частині курсу даються основні математичні співвідношення, які описують процеси взаємодії заряджених

частинок з електростатичними, магнітними та комбінованими полями. Метою курсової роботи є засвоєння сучасних практичних методів розрахунку електричних та магнітних полів електронно-оптичних елементів та систем, визначення траєкторій електронів в полі електронних лінз, а також знайомство з методами математичного моделювання електронно-оптичних елементів та систем.

1. Дослідження руху електрона в осі-симетричних електростатичних полях.

Мета: Засвоєння методів розрахунку розподілу потенціалів та траєкторій електронів в електростатичних осі-симетричних полях електронно-оптичних систем. Практичне дослідження теоретичних положень розділу курсу «Електронна оптика електростатичних полів» на основі математичного моделювання процесів руху заряджених часток в осі-симетричних електростатичних полях.

Методи розрахунку: Метод кінцевих різниць для розрахунку поля електростатичних лінз, метод лінійних відрізків осьового потенціалу при розрахунку траєкторій електронів в електростатичному полі лінзи.

1.1. Теоретичні положення.

В електронній оптиці дуже важливу роль грають електростатичні поля, які мають симетрією обертання, тобто симетричні відносно деякої осі. Виявляється, що такі осі-симетричні поля здатні створювати електронні зображення і грають відносно електронних пучків ту ж роль, яку грають відносно світлових пучків заломлюючі середовища, обмежені поверхнями обертання.

1.1.1. Розподіл потенціалу в осі-симетричному електричному полі.

Розглянемо електричне поле, яке задовольняє одній єдиній умові: воно є симетричним відносно осі z . Таке поле може бути утворене, наприклад, двома циліндрами або діафрагмами з отворами, що мають спільну вісь симетрії. Якщо прикласти до таких електродів постійні, але не рівні за величиною потенціали, то між електродами утвориться неоднорідне осі-симетричне електростатичне поле.

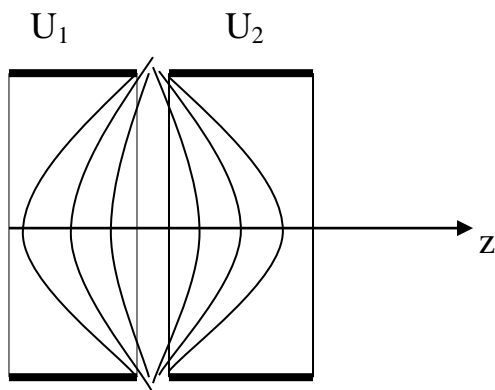


Рис.1. Електростатичне поле іммерсійної лінзи, що утворене двома циліндрами

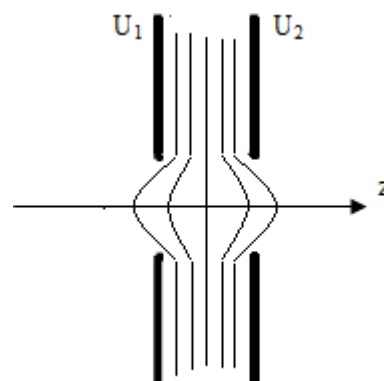


Рис.2. Електростатичне поле іммерсійної лінзи, що утворене двома діафрагмами

Розподіл потенціалу в такому полі, представленому в циліндричній системі координат (r, z, φ) , буде функцією лише відстані по осі симетрії z і відстані від осі симетрії r . Воно не буде залежати від азимутальної координати φ , т. е. $U=f(z, r)$, а $\frac{\partial U}{\partial \varphi}=0$. Очевидно, що картина поля буде повністю визначена, якщо відомий розподіл потенціалу в одній з так званих меридіональних площин, тобто в площині, що проходить через вісь симетрії поля. Крім того, ясно, що в такому полі $U(z, r)=U(z, -r)$, тобто аналітичний вираз у вигляді ступеневого ряду, що описує таке поле, може містити тільки парні ступені r .

У полі, вільному від зарядів, розподіл потенціалу задовольняє рівнянню Лапласа, яке в циліндричній системі координат для випадку осі-симетричного поля має вигляд:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} = 0. \quad (1-1)$$

Рішення рівняння (1-1) для осі-симетричного електричного поля може бути виражене у вигляді парної функції:

$$U(z, r) = U_0(z) - \frac{U_0''(z)}{4} r^2 + \frac{U_0^{IV}(z)}{4 \cdot 16} r^4 - \frac{U_0^{VI}(z)}{4 \cdot 16 \cdot 36} r^6 + \dots \quad (1-2)$$

Фізичне значення функції $U_0(z)$ вельми просте. Якщо в (1-2) покласти $r=0$, то $U(z, 0)=U_0(z)$, т. е. являє собою розподіл потенціалу вздовж осі симетрії поля.

З рівняння (1-2) видно, що розподіл потенціалу $U(z, r)$ осі-симетричного поля у всьому просторі повністю визначається розподілом потенціалу на осі симетрії поля. Якщо відомий розподіл потенціалу на осі симетрії поля, то тим самим визначені потенціали в будь-якій точці цього поля.

Тепер можна визначити складові напруженості осі-симетричного електричного поля відповідно до виразу $E = -gradU$:

$$\begin{cases} E_r = \frac{U_0''(z)}{2} r - \frac{U_0^{IV}(z)}{16} r^3 + \frac{U_0^{VI}(z)}{4 \cdot 6 \cdot 16} r^5 - \dots \\ E_z = -U_0'(z) + \frac{U_0'''(z)}{4} r^2 - \dots \end{cases} \quad (1-3)$$

Отримані рівняння для складових вектора напруженості осі-симетричного електростатичного поля є вельми громіздкими. Однак їх можна істотно спростити, враховуючи умови формування електронних пучків в електронно-променевих приладах (ЕПП). У більшості ЕПП електронні пучки формуються в при осевій області, електрони в перетині пучка мають однакову швидкість, яка визначається пройденою різницею потенціалів, і вектори швидкості електронів пучка направлені вздовж осі осі-симетричного поля.

Умови параксіальності електронів можна сформулювати таким чином:

1. Параксіальні електрони мало віддалені від оптичної осі поля так, що можна вважати $r \gg r^2$;

2. Складова швидкості параксіальних електронів v_z дорівнює повній швидкості електронів, тобто вектор швидкості параксіальних електронів направлений вздовж осі z осі-симетричного поля.

3. Швидкість електронів визначається в основному різницею потенціалів, пройденою електроном в електричному полі, і початковою швидкістю електрона v_0 , з якою електрон виходить з поверхні катоду, при аналізі процесу формування електронних пучків можна нехтувати, тобто $v_0=0$.

Враховуючи умови параксіальності електронів можна істотно спростити аналітичні вирази, що описують розподіли потенціалу в осі-симетричному полі, відкинувши з рівняння члени з високими ступенями r .

$$U(z, r) = U_0(z) - \frac{U_0''(z)}{4} r^2. \quad (1-4)$$

Відповідно складові напруженості електричного поля з осьовою симетрією будуть мати наступний вигляд:

$$E_r = -\frac{\partial U(z, r)}{\partial r} = \frac{U_0''(z)}{2} r; \quad (1-5)$$

$$E_z = -\frac{\partial U(z, r)}{\partial z} = -U_0'(z); \quad (1-6)$$

Знаючи значення складових напруженості електричного поля можна перейти до аналізу процесів руху параксіальних електронів в осі-симетричному електричному полі.

1.1.2. Рух параксіальних електронів в осі-симетричному електричному полі.

Зазначимо також, що у випадку осьової симетрії поля, складова його напруженості в напрямі азимута E_ϕ дорівнює нулю і електрон, що увійшов в поле в якійсь меридіональній площині, що проходить через вісь осі-симетричного поля, буде продовжувати рухатися в цій же площині, тобто траєкторія його буде плоскою кривою.

Для аксіально-симетричного електричного поля рівняння руху електрона мають вигляд:

$$\begin{cases} \frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{e}{m} E_z = \frac{e}{m} U_0'(z); \\ \frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{e}{m} E_r = -\frac{e}{m} \frac{U_0''(z)}{2} r; \end{cases} \quad (1-7)$$

$$(1-8)$$

Вирішуючи ці рівняння і виключаючи з них час отримуємо рівняння, що описує траєкторію рухомої частки:

$$\sqrt{U(z)} \frac{d}{dz} \left(\sqrt{U(z)} \frac{dr}{dz} \right) = -\frac{r}{4} U''(z) . \quad (1-9)$$

Якщо провести диференціювання в лівій частині рівняння (1-9), то воно приводиться до більш зручного для аналізу вигляду:

$$r''(z)U(z) + \frac{1}{2}r'(z)U'(z) + \frac{1}{4}r(z)U''(z) = 0 . \quad (1-10)$$

Рівняння (1-9) і (1-10) є дві форми одного і того ж співвідношення, яке являє собою рішення рівнянь руху зарядженої частки в осі-симетричному електричному полі і яке зв'язує координати її руху r і z в цьому полі. Отже, це є виражене в диференціальній формі рівняння траєкторії будь-якого параксіального електрона в осі-симетричному електричному полі. Щоб отримати рівняння траєкторії конкретного електрона в явному вигляді, необхідно інтегрувати диференціальне рівняння траєкторії (1-10) при відповідних даному електрону початкових умовах. Цими умовами будуть відстань електрона від осі, кут нахилу траєкторії до осі, а також величина різниці потенціалів, пройдена електроном в момент входу його в поле.

Точний аналітичний розрахунок диференціального рівняння траєкторії (1-10) в більшості практично цікавих випадків являє собою вельми не просту задачу. Однак навіть в своєму загальному вигляді це рівняння дозволяє зробити низку важливих практичних висновків:

1. У рівняння входить тільки розподіл потенціалу по осі симетрії поля $U(z)$. Тому траєкторія параксіального електрона визначається розподілом потенціалу на осі поля і граничними умовами, відповідними конкретному електрону.

2. У рівняння не входять ні заряд, ні маса рухомої в полі зарядженої частки. Це означає, що не тільки електрони, але і будь-які заряджені частки, в тому числі і набагато більш важкі негативні іони, будуть при співпадаючих початкових умовах рухатися по одних і тих же траєкторіях.

3. Рівняння (1-10) лінійне і однорідне відносно $U(z)$. Це означає, що потенціал і його похідні входять в рівняння в першому ступені і, крім того, права частина рівняння дорівнює нулю. Звідси відразу слідує, що якщо потенціали всіх електродів, що створюють поле, змінити пропорційно, то траєкторії електронів залишаються незмінними.

4. Рівняння лінійно і однорідне також і відносно $r(z)$. Тому, якщо модель є збільшеною копією електродів електронно-оптичної системи, то траєкторії електронів в ній залишаються геометрично подібними траєкторіям в реальній системі.

5. Будь-яке осі-симетричне поле є електронною лінзою і може створювати зображення за допомогою параксіальних електронів.

Сила, з якою осі-симетричне електростатичне поле діє на рухомий електрон в радіальному напрямі, дорівнює:

$$F_r = e \frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{er}{2} U''(z) . \quad (1-11)$$

Отже, якщо $U''(z) > 0$, що відповідає наростанню напруженості поля вздовж осі z , то радіальна сила направлена протилежно напрямку вектора r , тобто до осі поля. При цьому, траєкторія електрона буде відхилятися до осі симетрії поля. Діючи на рухомий пучок параксіальних електронів, таке поле буде прагнути зібрати їх до осі симетрії.

У випадку ж, якщо $U''(z) < 0$, радіальна сила направлена від осі z і пучок параксіальних електронів буде розсіюватися.

1.2. Програмне забезпечення курсової роботи.

Для математичного моделювання процесів руху заряджених часток в аксіально-симетричних електростатичних полях використовується спеціалізована програма LINZA. Програма написана на мові Borland PASCAL 7.0 з використанням об'єктно-орієнтованих бібліотек TURBO-VISION.

Завдання геометричних параметрів лінзи, що досліджується, потенціалів на її електродах і параметрів вльоту електрона здійснюється у віконному інтерфейсі програми LINZA, що моделює процес руху параксіального електрона в неоднорідному аксіально-симетричному електричному полі. Геометрія електродів задається за допомогою комбінацій циліндрів і діафрагм в циліндричній системі координат. Оскільки електронно-оптичні елементи мають осьову симетрію, геометрія електродів задається в площині, що проходить через вісь симетрії поля. Для кожного елемента електродів лінзи необхідно задати три параметри:

- потенціал;
- координату (для діафрагми - нижня точка, а для циліндра – ліва точка);
- довжину електрода.

Увага! Потенціали елементів одного і того ж електрода мають однаковий потенціал.

Параметри електродів задаються в діалоговому вікні, яке можна викликати натисненням клавіш F5 і F6. Після завдання параметрів першого електрода натиснути клавішу ENTER і на екрані з'явиться вікно параметрів наступного електрода. При неправильному завданні параметрів електродів курсор зміщується в рядок введення цього параметра. У цьому випадку необхідно змінити параметри електрода. Після введення параметрів системи, їх можна переглянути і відредагувати у вікні перегляду «Список електродів», яке можна викликати комбінацією клавіш Alt-0. У цьому вікні можна змінити параметри електрода (натисненням клавіші ENTER, або клацнувши два рази правою кнопкою мишки), видалити електрод (натисненням клавіші DEL), а так само ввести нові електроди (F5 і F6).

Розрахунок поля проводиться при натисненні клавіші F9. Розрахунок поля проводиться методом кінцевих різниць (методом сіток). Розраховані дані можна зберегти в файлі (клавіша F2) або переглянути графічно у вигляді екіпотенціальних поверхонь.

При графічному перегляді на екрані відображаються електроди лінзи, що моделюється, і її поле. На картині поля видна стрілка, яка може бути виведена за допомогою маніпулятора "миша" в будь-яку точку поля лінзи. При встановленні маркера миші на вибрану точку поля у рядку під зображенням картини поля відображаються координати і потенціал тієї точки поля, на яку вказує стрілка. Результати розрахунку, що містяться в файлі даних, можуть бути представлені графічно на екрані монітора або роздруковані за допомогою програми LEX.

Вибравши пункт меню "Налаштування" можна задати кількість ітерацій розрахунку поля лінзи, ім'я файлу даних і кількість градацій сірого на графічному зображенні поля лінзи.

Робота з бібліотеками.

При необхідності за допомогою бібліотеки 'LINZA.LIB' можлива робота з моделями найбільш поширених елементів електронно-оптичних систем. Для цього необхідно вибрати в пункті меню "Бібліотека" систему електродів елемента електронно-оптичної системи, після чого можна внести зміни в параметри електродів.

Обмеження програми.

Програма розрахунку поля дозволяє задавати довільні значення параметрів електродів і потенціалів на них. Однак, для правильного визначення параметрів електронної лінзи необхідно, щоб поле лінзи не вийшло за межі її електродів.

Розміри системи..... 200 мм на 200 мм.

Максимальний потенціал..... +32767 В.

Мінімальний потенціал -32767 В.

Кількість електродів..... 15.

Кількість елементів в бібліотеці..... 15.

Розрахунок траєкторії руху електрона в полі лінзи.

Для розрахунку траєкторії руху електрона в осі-симетричному електричному полі програмно реалізований метод лінійних відрізків осьового потенціалу. Для розрахунку траєкторії необхідно задати параметри вльоту електрона в діалоговому вікні «Електрон». Параметрами вльоту електрона в полі є:

- відстань електрона від осі $R(0)$;
- кут вльоту електрона, утворений дотичною траєкторії електрона з віссю симетрії поля в точці вльоту електрона.

Розрахунок траєкторії здійснюється в тому випадку, якщо поле по всій своїй довжині не міняє знак потенціалу. Якщо поле на осі міняє знак потенціалу, тобто є ділянки поля де потенціал $U_z < 0$, то на екран монітора виводиться попередження. У цьому випадку необхідно виправити дані для розрахунку поля і траєкторії електрона.

Результати розрахунку поля і траєкторії електрона відображаються в графічному вигляді на екрані монітора. Тут же відображається геометрія

електродів лінзи, що моделюється. Потрібно мати на увазі, що результати розрахунку траєкторії електрона автоматично масштабуються по максимальному радіальному розміру системи електродів, що моделюється.

1.3. Програма курсової роботи.

1.3.1. Розрахунок електростатичного поля електронної лінзи за методом кінцевих різниць.

По заданих геометрії електродів та потенціалах на них розрахувати поле електростатичної лінзи. Параметри електродів та потенціали на них задані в таблиці 1. Варіант вибрати за номером в списку групи.

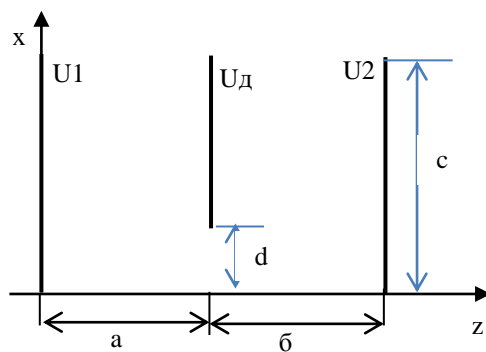


Рис.3. Ліза - діафрагма

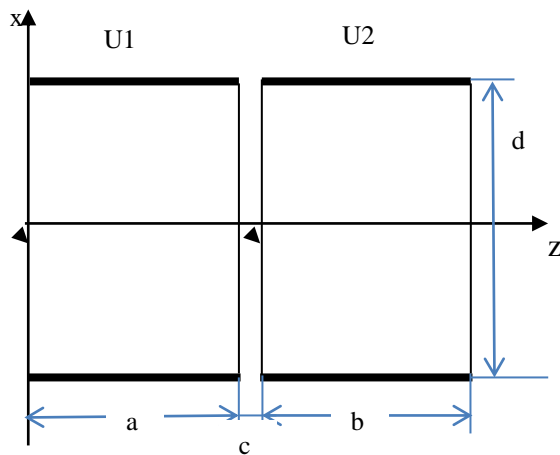


Рис.4. Імерсійна лінза

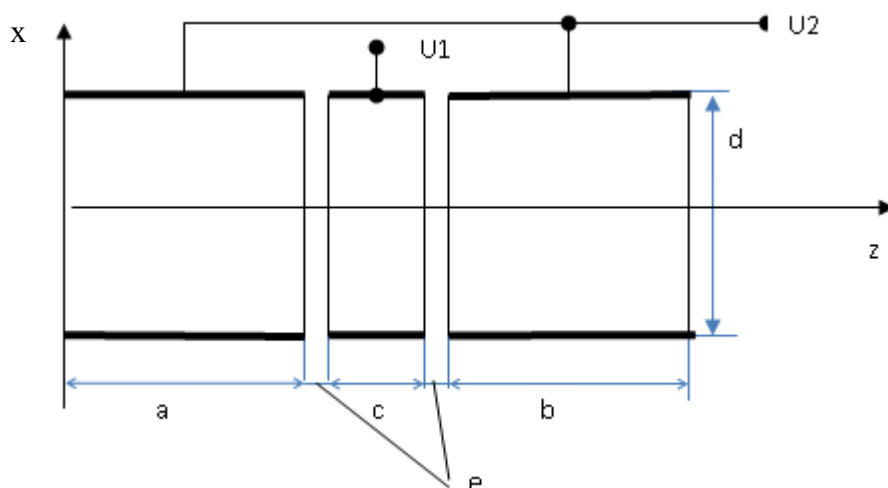


Рис.5. Одиночна лінза

Для розрахунку поля електростатичної лінзи використати розрахунковий метод кінцевих різниць. Розраховувати поле в системі координат. Крок координатної сітки 0.2, 0.5 мм. Вузли координатної сітки повинні співпадати з геометрією електродів. На кожній ітерації розраховувати потенціали у всіх вузлах координатної сітки. При переході на наступну ітерацію результати попередньої ітерації брати за вихідні данні для розрахунку. Розрахунок проводити доти, поки потенціали в вузлах координатної сітки не будуть змінюватися.

Таблица 1.

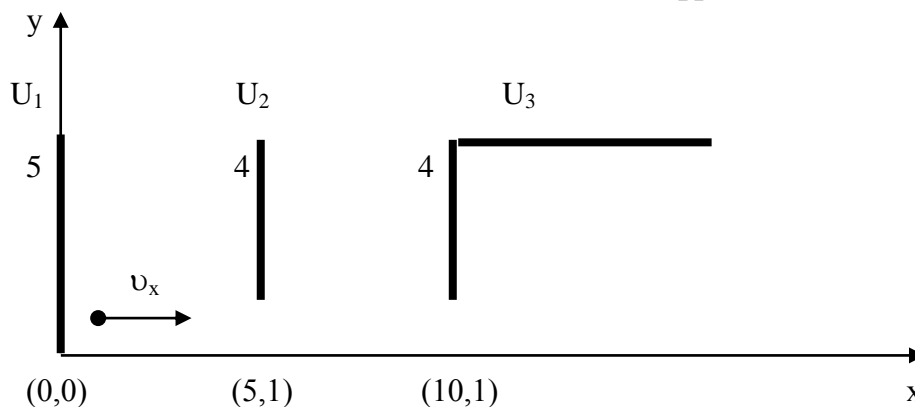
| № | Тип лінзи | a [мм] | b[мм] | c[мм] | d[мм] | e[мм] | U1[B] | U2[B] | U _д [B] |
|----|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|
| 1 | Рис. 3 | 5 | 5 | 5 | 2 | | 50 | 250 | 70 |
| 2 | Рис. 4 | 15 | 15 | 2 | 10 | | 50 | 250 | |
| 3 | Рис. 5 | 15 | 15 | 5 | 10 | 2 | 50 | 250 | |
| 4 | Рис. 3 | 5 | 5 | 8 | 1.5 | | 50 | 350 | 100 |
| 5 | Рис. 4 | 15 | 15 | 2 | 16 | | 250 | 50 | |
| 6 | Рис. 5 | 15 | 15 | 4 | 16 | 2 | 250 | 50 | |
| 7 | Рис. 3 | 5 | 5 | 5 | 1 | | 50 | 450 | 400 |
| 8 | Рис. 4 | 20 | 20 | 2 | 10 | | 100 | 500 | |
| 9 | Рис. 5 | 20 | 20 | 5 | 10 | 2 | 500 | 100 | |
| 10 | Рис. 3 | 5 | 5 | 8 | 1.5 | | 50 | 450 | 100 |
| 11 | Рис. 4 | 15 | 15 | 1 | 16 | | 50 | 450 | |
| 12 | Рис. 5 | 15 | 15 | 4 | 12 | 2 | 25 | 350 | |
| 13 | Рис. 3 | 5 | 8 | 8 | 1.5 | | 50 | 450 | 350 |
| 14 | Рис. 4 | 20 | 20 | 1 | 16 | | 350 | 25 | |
| 15 | Рис. 5 | 20 | 20 | 3 | 14 | 1 | 350 | 25 | |
| 16 | Рис. 3 | 5 | 10 | 10 | 2 | | 20 | 180 | 50 |
| 17 | Рис. 4 | 15 | 15 | 1 | 10 | | 50 | 250 | |
| 18 | Рис. 5 | 15 | 15 | 5 | 10 | 3 | 25 | 250 | |
| 19 | Рис. 4 | 15 | 15 | 2 | 10 | | 50 | 550 | |
| 20 | Рис. 5 | 15 | 15 | 3 | 10 | 2 | 550 | 50 | |

За результатами розрахунку поля електростатичної лінзи визначити розподіл потенціалу вздовж осі поля. Результати розрахунку представити у графічному вигляді. Для зручності графічного представлення поля електростатичної лінзи використовуйте масштабування геометрії електродів та координатної сітки. Опис методу кінцевих різниць, алгоритм розрахунку, картину поля лінзи, графік розподілу потенціалу вздовж осі поля занести в протокол курсової роботи. Перевірити результати розрахунку за допомогою програми LINZA.

1.3.2. Дослідження руху електрона в осі – симетричних електростатичних полях електронних лінз.

Цей розділ курсової роботи виконується за допомогою програми LINZA.

1.3.2.1 Лінза-діафрагма.



а) Задайте параметри електродів лінзи-діафрагми і потенціали на них так, щоб напруженість поля зліва від діафрагми була менше напруженості справа від діафрагми. Виконайте розрахунок поля лінзи. Результати розрахунку в графічному вигляді виводяться автоматично на екран монітора. Розподіл потенціалу в полі електростатичної лінзи, що моделюється, на екрані монітора представлений у рівнях яскравості, тобто більшому потенціалу в конкретній точці поля відповідає більший рівень яскравості зображення. Кількісно визначити потенціал в вибраній точці поля можна за допомогою маркера маніпулятора „миша”. Для цього встановіть маркер на точку поля, потенціал якої бажаєте визначити. При цьому під картиною поля відображаються координати вибраної точки поля і її потенціал. Зазвичай картина електростатичного поля представляється у вигляді екіпотенціальних поверхонь (на площині – екіпотенціальних ліній). Щоб побачити таку картину поля зайдіть в меню програми „Налаштування” та виберіть в цьому вікні кількість градацій яскравості - 8. При цьому на екрані картина поля буде представлена у вигляді екіпотенціальних ліній.

По графічному зображенню картини поля за допомогою маркера маніпулятора «миша» досліджуйте розподіл потенціалу в полі лінзи, що моделюється. Початкові дані і результати розрахунку занесіть в протокол

виконання роботи. Картину поля представте у вигляді еквіпотенціальних ліній з позначенням їх потенціалів.

б) Задайте параметри вльоту електрона:

- точка вльоту -2(2 мм.);
- кут вльоту 0 град.

Виконайте розрахунок і виведіть на екран монітора результати розрахунку. Результати розрахунку занесіть в протокол роботи. Зверніть увагу на величину фокусної відстані лінзи, хід траєкторії електрона до попадання в поле лінзи, в полі лінзи і після виходу за межі електронної лінзи. На основі теорії руху заряджених часток в неоднорідному осі-симетричному електростатичному полі поясніть поведінку електрона в процесі його руху. Результати моделювання та їх пояснення занесіть в протокол курсової роботи.

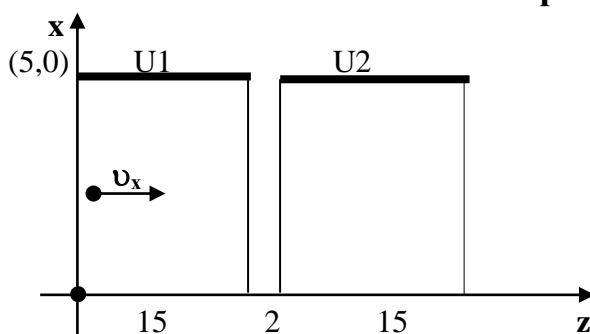
с) Дослідження умов параксіальності електронів на прикладі лінзи-діафрагми. Для цього при нульовому куті вльоту електрона декілька разів змініть точку вльоту електрона і виконаєте розрахунок траєкторії його руху. При цьому зверніть увагу, що всі параксіальні траєкторії перетинають вісь поля в одній точці, тобто дана точка перетину осі поля траєкторіями параксіальних електронів є параметром (фокусом) електронної лінзи-діафрагми. Отримані результати поясніть на основі теорії руху електронів в осі-симетричних електростатичних полях.

д) Трохи змініть кут вльоту електрона (1÷5 град.). Декілька разів замініть точку вльоту електрона в поле лінзи і виконаєте розрахунок траєкторій електрона. Отримані результати занесіть в протокол роботи. Поясніть отримані результати.

е) Збільшить оптичну силу лінзи. Яким чином можна змінювати оптичну силу лінзи-діафрагми?

ф) Задайте параметри електродів лінзи-діафрагми такими, щоб її поле розсіювало параксіальні електрони. Виконайте розрахунок поля лінзи. Картину поля, розподіл потенціалу на осі і траєкторію електрона занесіть в протокол роботи. Поясніть отримані результати.

1.3.2.2 Імерсійна лінза.



а) Задайте геометричні параметри електродів імерсійної лінзи, як показано на рисунку.. Задайте потенціали електродів таким чином, щоб $U_1 > U_2$. Виконайте розрахунок поля лінзи. За допомогою маркера маніпулятора «миша»

досліджуйте розподіл потенціалу в полі лінзи, що моделюється. Якщо неоднорідне поле лінзи виходить за межі електродів лінзи, то необхідно збільшити довжину електродів, або справа і зліва закрити електроди діафрагмами з відповідними потенціалами.. Вихідні дані і результати розрахунку занесіть в протокол практичної роботи. Картину поля представте у вигляді еквіпотенційних ліній і позначте їх потенціали.

b) Задайте параметри вльоту електрона:

- точка вльоту -3(3 мм.)
- кут вльоту 0 град.

Виконайте розрахунок і виведіть на екран монітора результати розрахунку. Результати розрахунку занесіть в протокол роботи. Звернути увагу на величину фокусної відстані лінзи, хід траєкторії електрона до попадання в поле лінзи, в полі лінзи і за межами неоднорідного поля імерсійної лінзи. Якщо фокус лінзи знаходиться за межами електродів лінзи, то необхідно збільшити довжину останнього електрода (довжину системи) таким чином, щоб траєкторія електрона перетнула вісь симетрії поля в межах заданих електродів. На основі теорії руху заряджених часток в неоднорідному аксіально-симетричному електростатичному полі пояснити поведінку електрона в процесі його руху.

Дослідіть умови параксіальності електронів на прикладі імерсійної лінзи. Для цього при нульовому куті вльоту електрона декілька разів змініть точку вльоту електрона і зробіть розрахунок траєкторій їх руху. При цьому звернете увагу на постійність фокусної відстані лінзи.

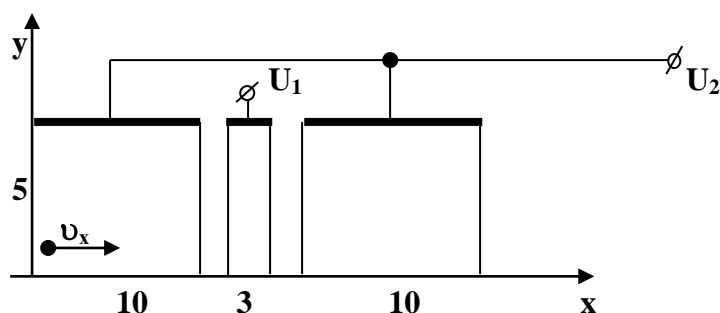
c) Трохи змініть кут вльоту електрона ($1 \div 5$ град.). Декілька разів змініть точку вльоту електрона в поле лінзи і виконаєте розрахунок траєкторій електрона. Отримані результати занесіть в протокол роботи. Поясніть отримані результати.

При тих же потенціалах (п. 1.3.2.1.) змініть пропорційно (в $2 \div 5$ разів) геометричні розміри електродів лінзи. Зробіть розрахунок поля і траєкторій руху електрона. При цьому визначите, у скільки разів змінилася фокусна відстань лінзи в порівнянні з початковими параметрами лінзи. Повторіть експеримент декілька разів. Отримані результати занесіть в протокол роботи. Поясніть отримані результати.

d) При геометричних розмірах імерсійної лінзи, відповідних п. 1.3.2.1., змініть пропорційно (в $2 \div 5$ разів) потенціали на її електродах. Зробіть розрахунок поля і траєкторій руху електрона. Зверніть увагу на фокусну відстань лінзи і порівняйте з попереднім значенням. Повторіть експеримент декілька разів. Отримані результати занесіть в протокол роботи. Поясніть отримані результати.

e) При геометричних розмірах імерсійної лінзи, відповідних п. 1.3.2.1. Програми, поміняйте місцями потенціали на електродах лінзи. Зробіть розрахунок поля і траєкторій руху електрона. Результати розрахунку занесіть в протокол роботи. Поясніть хід траєкторії електрона в полі лінзи.

1.3.2.3 Одиночна лінза.



а) Задайте геометричні параметри електродів одиночної лінзи відповідно до рисунку.. Задайте потенціали електродів таким чином, щоб $U_1 < U_2$. Виконайте розрахунок поля лінзи. За допомогою маркера маніпулятора «миша» дослідіть розподіл потенціалу в полі лінзи, що моделюється. Якщо неоднорідне поле лінзи виходить за межі електродів лінзи, то необхідно збільшити довжину крайніх електродів і закрити зліва та справа електроди лінзи діафрагмами з відповідними потенціалами. Початкові дані і результати розрахунку занесіть в протокол роботи. Картину поля представте у вигляді еквіпотенційних ліній.

б) Задайте параметри вльоту електрона:

- точка вльоту -3(3 мм);
- кут вльоту 0 град.

Виконайте розрахунок траєкторії і виведіть результати розрахунку на екран монітора. Результати розрахунку занесіть в протокол роботи. Зверніть увагу на величину фокусної відстані лінзи, хід траєкторії електрона до попадання в поле лінзи, в полі лінзи і в за полем лінзи. Якщо фокус лінзи знаходиться за межами електродів лінзи, то необхідно збільшити довжину останнього електрода (довжину системи) таким чином, щоб траєкторія електрона перетнула вісь симетрії поля в межах системи, що моделюється. На основі теорії руху заряджених часток в неоднорідному аксіально-симетричному електростатичному полі пояснити поведінку електрона в процесі його руху.

с) Дослідіть умови параксіальності електронів для одиночної лінзи. Для цього при нульовому вугіллі вльоту електрона декілька разів змініть точку вльоту електрона і зробіть розрахунок траєкторії його руху. При цьому звернете увагу на постійність фокусної відстані лінзи.

д) Трохи змініть кут вльоту електрона (1÷5 град.). Декілька разів змініте точку вльоту електрона в полі лінзи і виконаєте розрахунок траєкторії електрона. Отримані результати занесіть в протокол роботи. Поясніть отримані результати.

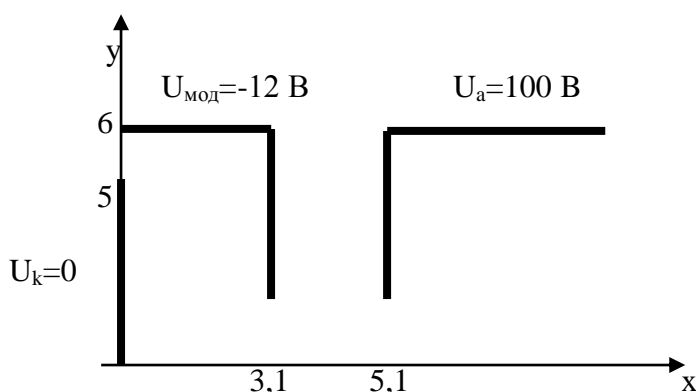
е) При тих же потенціалах (п. 1.3.3.1.) змініть пропорційно (в 2 ÷ 5 разів) геометричні розміри електродів лінзи. Зробіть розрахунок поля і траєкторії руху електрона. При цьому визначите, у скільки разів змінилася фокусна

відстань лінзи в порівнянні з початковими параметрами лінзи. Повторіть експеримент декілька разів. Отримані результати занесіть в протокол роботи. Поясніть отримані результати.

ф) При геометричних розмірах одиночної лінзи, відповідних п. 1.3.3.1., змініть пропорційно (в $2\div 4$ рази) потенціали на її електродах. Зробіть розрахунок поля і траєкторій руху електрона. Зверніть увагу на зміну фокусної відстані лінзи в порівнянні з попередніми значеннями. Повторіть експеримент декілька разів. Отримані результати занесіть в протокол роботи. Поясніть отримані результати.

г) При геометричних розмірах одиночної лінзи, відповідних п. 1.3.3.1., поміняйте місцями потенціали на електродах лінзи. Зробіть розрахунок поля і траєкторій руху електрона. Результати розрахунку занесіть в протокол роботи. Поясніть хід траєкторії електрона в полі лінзи.

1.3.2.4. Імерсійний об'єктив.



а) Задайте геометричні параметри електродів імерсійного об'єктива і потенціали на його електродах відповідно до рисунка. Виконайте розрахунок поля імерсійного об'єктива. За допомогою маркера маніпулятора «миша» дослідіть розподіл потенціалу в полі лінзи, що моделюється. Якщо на ділянці між катодом і модулятором на осі поля потенціал нижче за потенціал катода, то всі електрони, що вийшли з поверхні катода, попадають в гальмівне поле і повертаються на катод. Області негативних потенціалів представлені жовтим кольором. У цьому випадку потрібно злегка підвищити потенціал модулятора і тим самим створити умови, при яких прискорююче поле примикає до поверхні катода. Задайте параметри вльоту електрона ($r=1$, $\gamma=0$) і виконайте розрахунок траєкторії електрона. Початкові дані і результати розрахунку занесіть в протокол роботи. Картину поля представте у вигляді екіпотенційних ліній.

б) Змінюючи геометрію і потенціали електродів, встановіть точку перетину траєкторії з віссю x на ділянці між модулятором і анодом. Отриману геометрію електродів і їх потенціали занесіть в протокол роботи.

с) Дослідіть умови параксіальності електронів для імерсійного об'єктива. Для цього при нульовому куту вльоту електрона декілька разів змініть точку вльоту електрона і зробіть розрахунок траєкторії його руху.

d) Змініть кут вльоту електрона ($1 \div 30$ град.). Декілька разів змініть точку вльоту електрона в поле лінзи і виконаєте розрахунок траєкторії електрона. Отримані результати занесіть в протокол роботи. При цьому зверніть увагу на постійність фокусної відстані лінзи. Поясніть отримані результати.

е) Визначте способи зміни оптичної сили імерсійного об'єктиву.

1.3.3. Контрольні питання.

1. На чому засноване використання методу кінцевих різниць при розрахунку поля електростатичної лінзи і в чому суть даного методу?
2. Яким чином можна визначити розподіл потенціалу на осі осі-симетричного електростатичного поля?
3. Дайте визначення електронної лінзи.
4. Якими властивості мають лінза-діафрагма, імерсійний об'єктив, імерсійна і одиночна лінзи?
5. У чому суть методу лінійних відрізків осьового потенціалу?
6. Які параметри характеризують початкові умови вльоту електрона в поле лінзи, що моделюється?
7. Від чого залежить фокусна відстань імерсійної лінзи?
8. Чому імерсійна і одиночна електронні лінзи завжди фокусують пучок параксіальних електронів?

1.3.4. Зміст протоколу роботи.

1. Мета і задачі практичної курсової роботи.
2. Дати короткий опис методів визначення електричних полів і траєкторій електронів, які використовуються при дослідженні електронних лінз.
3. Розрахувати поле електростатичної лінзи, тип і параметри якої задані викладачем. Перевірити розрахунок за допомогою програми „LINZA”. Результати розрахунку занести в протокол курсової роботи.
4. По кожному пункту програми курсової роботи занести в протокол початкові дані і результати розрахунку. Представте теоретичне обґрунтування отриманих результатів і зробіть висновки.
5. Дайте письмові відповіді на контрольні питання.

2. Дослідження процесів руху електрона в осі-симетричному полі магнітних електронних лінз.

Мета роботи: Дослідження руху електрона в однорідному і неоднорідному осі-симетричному магнітному полі за допомогою математичної моделі процесів взаємодії електрона з магнітним полем.

Методи розрахунку: Визначення індукції магнітного поля на основі закону Біо-Савара-Лапласа, розрахунковий метод визначення траєкторії електрона,

заснований на розрахунку основного рівняння траєкторії електрона для магнітних полів.

2.1. Загальні положення.

При відсутності електростатичного поля система рівнянь, що описують рух електрона в магнітному полі, записується у вигляді:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = -e(v_y B_z - v_z B_y) ; \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = -e(v_z B_x - v_x B_z) ; \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} = -e(v_x B_y - v_y B_x) ; \end{cases} \quad (2-1)$$

Для розрахунку системи рівнянь (2-1) необхідно знати розподіл магнітної індукції $B=B(x, y, z)$. У свою чергу, вектор магнітної індукції \mathbf{B} можна представити у вигляді вихору деякого допоміжного вектора \mathbf{A} , який носить назву векторного потенціалу магнітного поля

$$\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A}, \quad (2-2)$$

причому вектор \mathbf{A} при заданому розподілі в просторі струмів є функцією координат.

Оскільки в електронно-оптичних системах магнітні поля в більшості випадків створюються котушками, тобто сукупністю кругових провідників, площини яких перпендикулярні осі z , а центри лежать на цій осі, то розглянемо більш детально магнітне поле, яке має осьову симетрію. Таке поле зручно представити в циліндричній системі координат (z, r, φ) :

$$\begin{cases} B_z = (\text{rot} \mathbf{A})_z = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial(r \cdot A_\varphi)}{\partial r} - \frac{\partial A_r}{\partial \varphi} \right] ; \\ B_r = (\text{rot} \mathbf{A})_r = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} ; \\ B_\varphi = (\text{rot} \mathbf{A})_\varphi = \frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} ; \end{cases} \quad (2-3)$$

Векторний магнітний потенціал визначається розподілом струмів в просторі, що розглядається, відповідно до відомої формули

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_v \frac{\mathbf{J} dv}{r}, \quad (2-4)$$

де \mathbf{J} - вектор щільності струму.

У випадку осі-симетричного розташування витків котушки струм буде протікати тільки в азимутальному напрямі.

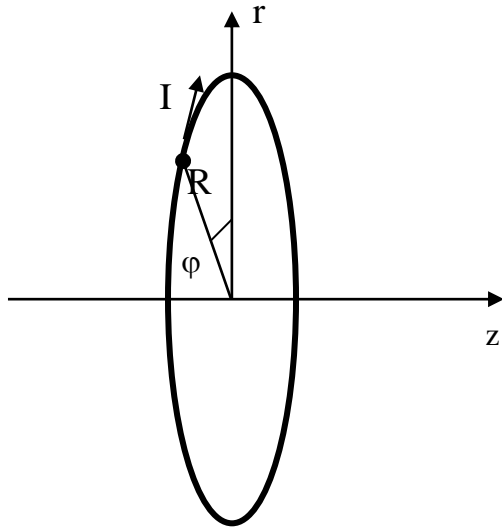


Рис. 2-1. Напрямок струму у витку котушки.

Векторний магнітний потенціал у випадку, що розглядається, має тільки одну складову A_ϕ , тобто $A_z=A_r=0$. Якщо підставити ці значення в рівняння (2-14), то отримаємо тільки два вектори індукції аксіально-симетричний магнітного поля, які пов'язані з векторним магнітним потенціалом співвідношеннями:

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(r \cdot A_\phi)}{\partial r} ; \quad (2-5)$$

$$B_r = -\frac{\partial A_\phi}{\partial z} . \quad (2-6)$$

При цьому $V_\phi=0$.

Отже, магнітне поле з осьовою симетрією має тільки дві складові магнітної індукції: подовжню (2-5) і радіальну (2-6). Обидві складові індукції B_r і B_z визначаються тільки однією складовою векторного магнітного потенціалу A_ϕ . Розподіл векторного магнітного потенціалу в осі-симетричному магнітному полі може бути представлений у вигляді степеневого ряду, що містить члени з непарними степенями при r .

$$A(z,r) = \frac{B(z)}{2}r - \frac{B''(z)}{16}r^3 + \dots \quad (2-7)$$

Отримане рівняння показує:

- а. знаючи значення магнітної індукції на осі симетрії магнітного поля можна визначити векторний потенціал в будь-якій точці цього поля;
- б. розподіл магнітної індукції в аксіально-симетричному магнітному полі $B=B(z,r)$ однозначно визначається значенням магнітної індукції на осі цього поля.

Тепер можна у відповідності з (2-5) і (2-6) визначити складові вектора магнітної індукції для випадку осі-симетричного магнітного поля.

$$B_r = -\frac{B'(z)}{2}r + \frac{B'''(z)}{16}r^3 - \frac{B^{(5)}(z)}{16 \cdot 6}r^5 + \dots \quad (2-8)$$

$$B_z = B(z) - \frac{B'''(z)}{4}r^2 + \frac{B^{IV}(z)}{4 \cdot 16}r^4 - \dots \quad (2-9)$$

Поле на осі котушки визначається на основі закону Біо-Савара. Для окремого кругового витка радіуса R , по якому тече струм I , напруженість магнітного поля визначається співвідношенням:

$$H(z) = \frac{R^2 I}{2(R^2 + z^2)^{3/2}}; \quad (2-10)$$

$$H(z) = \frac{B(z)}{\mu} \quad (2-11)$$

Звідси видно, що напруженість поля на осі витка має найбільше значення в центрі витка і із збільшенням відстані від центра кругового витка індукція магнітного поля зменшується, прагнучи до нуля. Напруженість поля котушки, що складається з n витків на одиницю осьової довжини, отримуємо підсумовуванням по всіх витках.

2.2. Рух електрона в однорідному осі-симетричному магнітному полі.

Магнітне поле взаємодіє лише з рухомою зарядженою часткою, вектор швидкості якої не паралельний силовим лініям магнітного поля. При цьому сила поля, що діє на електрон, визначається рівнянням:

$$\mathbf{F} = -e[\mathbf{v} \times \mathbf{B}] \quad (2-12)$$

Розглянемо довгу котушку циліндричної форми, по якій тече струм (рис. 2-2). Магнітне поле всередині котушки однорідне і має тільки одну складову B_z . Виберемо в цій області деяку точку a , і будемо вважати, що вона є джерелом електронів. Розглянемо траєкторію електрона, швидкість якого направлена під кутом α до осі z .

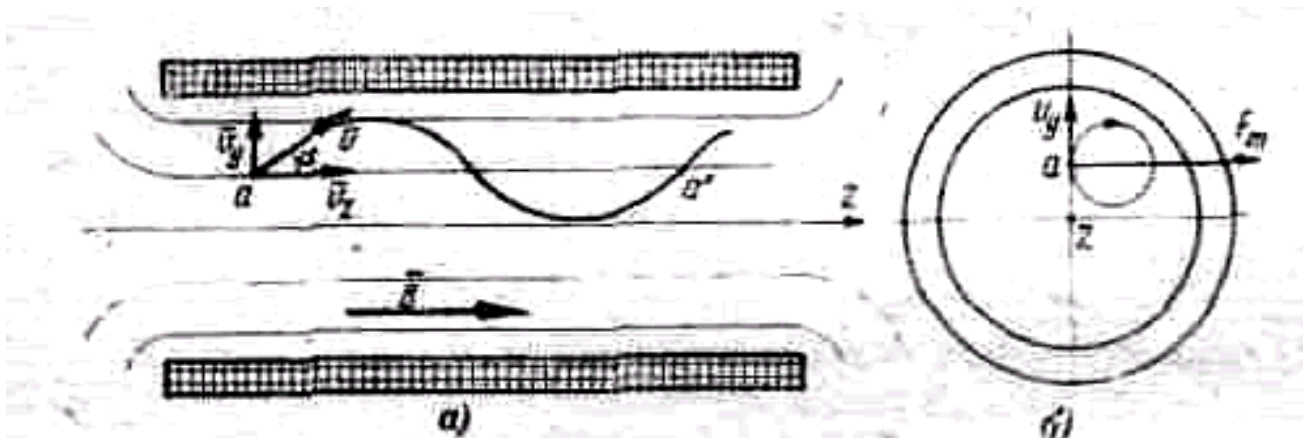


Рис. 2-2. Довга магнітна лінза.

Складові швидкості v_z паралельна напрямку силових ліній поля і вектору \mathbf{B} . Отже, вона не буде викликати взаємодії електрона з полем, і електрон буде

рівномірно зміщуватися вздовж осі z . Компонента ж швидкості v_y перпендикулярна напрямку \mathbf{B} і буде визначати силу, з якою магнітне поле діє на електрон. Ця сила в перший момент буде направлена перпендикулярно площині креслення у напрямі до нас. Чисельно величина цієї сили може бути визначена рівнянням

$$F_m = ev_y B \quad , \quad (2-13)$$

Ця сила направлена перпендикулярно до векторів v_y і \mathbf{B} , буде викривляти траєкторію руху електрона і завжди направлена до центру обертання електрона. Ця доцентрова сила урівноважується відцентровою силою

$$F_c = \frac{mv_y^2}{R} \quad , \quad (2-14)$$

де R радіус кривизни траєкторії в даній точці. Отже,

$$ev_y B = \frac{mv_y^2}{R} \quad . \quad (2-15)$$

Звідси отримуємо формулу для визначення радіуса кривизни траєкторії електрона

$$R = \frac{mv_y}{eB} \quad (2-16)$$

Радіус кривизни траєкторії, по якій рухається електрон, не залежить від координат електрона. Отже, $R = \text{const}$, і електрон рухається в площині, перпендикулярній осі котушки (Рис. 2-2,б), по колу. Але при цьому завдяки наявності v_z він зміщується з постійною швидкістю вздовж осі z , тобто рухається по гвинтовій лінії. При цьому через деякий час

$$T = \frac{2\pi R}{v_y} = \frac{2\pi m}{eB} \quad (2-17)$$

електрон здійснить повний оборот по колу, і знову перетне силову лінію \mathbf{aa}' . Як видно з рівняння (2-17) час T не залежить від величини початкової швидкості електрона. Тому якщо з вибраної нами точки \mathbf{a} вийде одночасно декілька параксіальних електронів (рис. 2-2), то через один і той же час T всі вони перетнуть силову лінію поля \mathbf{aa}' в точці \mathbf{a}' розташованій на відстані $v_z T$ від точки \mathbf{a} . Таким чином, точку \mathbf{a}' можна вважати електронним зображенням точки \mathbf{a} . Все сказане справедливе для будь-якої точки площини, перпендикулярної осі z і що проходить через точку \mathbf{a} . Тому в точці \mathbf{a}' ми отримуємо електронне зображення джерела параксіальних електронів, яке знаходиться в площині \mathbf{a} . Таким чином, однорідне магнітне поле довгої котушки є електронною лінзою, яка дає пряме зображення з лінійним збільшенням, що дорівнює одиниці.

2.3. Рух електрона в неоднорідному аксіально-симетричному магнітному полі.

Розглянемо рух електрона в осі-симетричному магнітному полі, в якому вектор магнітної індукції \mathbf{B} має відмінні від нуля складові B_r і B_z . Азимутальна

складова $B_\phi=0$. Таке поле може бути створене короткою котушкою, по якій тече струм. Причому будемо вважати, що напруженість поля має помітну величину на деякому відрізку **аб** вздовж осі симетрії z .

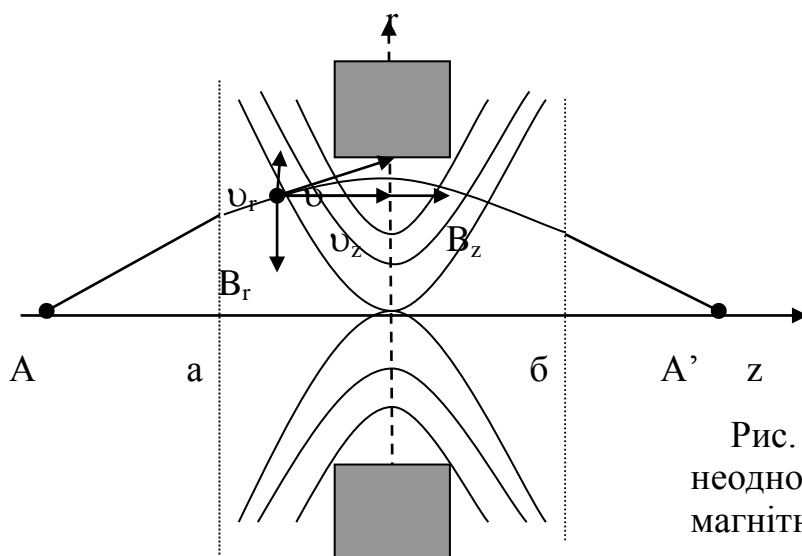


Рис. 2-3. Рух електрона в неоднорідному осі-симетричному магнітному полі.

При попаданні в область поля електрон починає взаємодіяти з ним, внаслідок чого з'являються сили, що викривляють його траєкторію. Якщо розкласти швидкість v і індукцію B на радіальні і осьові складові (v_r , v_z і B_r , B_z), то внаслідок взаємодії електрона з полем виникне пара сил:

$$F_1 = -ev_z B_r ; F_2 = -ev_r B_z .$$

Напрямок цих сил співпадає. Внаслідок дії сили F електрон придбає азимутальну складову швидкості v_ϕ . Ця складова швидкості направлена перпендикулярно B_z , внаслідок чого виникає нова сила, направлена до осі симетрії поля і що є фокусуючою силою магнітного поля. Таким чином, можна зробити висновки:

1. При взаємодії електрона з неоднорідним магнітним полем виникає фокусуюча сила, направлена до осі симетрії поля.
2. Траєкторія електрона викривляється і принципово не може бути плоскою кривою.

2.4. Програмне забезпечення.

Для математичного моделювання процесів руху заряджених часток в аксіально-симетричних магнітних полях використовується спеціалізована програма Magnit25.exe. Завдання параметрів лінзи, що досліджується і параметрів вльоту електрона здійснюється у віконному інтерфейсі програми Magnit25.exe, що моделює процес руху параксіального електрона в однорідному і неоднорідному осі-симетричному магнітному полі. Вибір типу лінзи, що досліджується, здійснюється в головному меню програми.

Параметри лінзи, що моделюється, і параметри вльоту електрона задаються в діалогових вікнах «SETUP-B» і «SETUP-e», які можна викликати

натисненням маніпулятора «миша» на відповідних кнопках головного меню програми. Розрахунок розподілу індукції магнітного поля і траєкторії руху електрона проводиться натисненням кнопки «Графік» в головному меню програми. При цьому на екран монітора виводяться результати розрахунку індукції магнітного поля і траєкторії руху електрона в заданому полі соленоїда. Оскільки траєкторія електрона в магнітному полі принципово не є плоскою кривою, то результати розрахунку відображаються в декартовій системі координат, яку можна повертати в будь-якому напрямі. Для цього в меню режиму «Графік» потрібно клацнути «мишкою» на клавіші «Нахил осей». При цьому на екран монітора виводиться вікно управління виводом результатів розрахунку. Виберіть за допомогою маніпулятора «миша» напрям повороту осей координат і натисніть ліву кнопку «миші». Протягом часу натиснення клавіші система координат буде повертатися у вибраному напрямі.

Початок системи координат можна перемістити в будь-яку точку екрана. Для цього необхідно встановити стрілку маніпулятора «миша» на кнопку «Центр» і клацнути лівою клавішею «миші». Кнопка «Центр» у вікні управління повинна утопитися. Після цього маркер маніпулятора «миша» треба перемістити на бажану ділянку поля відображення і клацнути лівою клавішею миші. Початок координат переміститися у вибрану точку.

У цьому ж вікні управління можна вибрати повільне виведення траєкторії руху електрона.

2.5. Дослідження руху електрона в однорідному аксіально-симетричному полі соленоїда.

2.5.1. Виберіть у вікні управління режим дослідження руху електрона в однорідному аксіально-симетричному полі соленоїда. Для цього встановіть за допомогою маніпулятора «миша» хрестик у віконці поруч з написом «довга котушка». Виберіть за допомогою маніпулятора «миша» з головного меню програми режим завдання параметрів котушки «SETUP-B» і клацніть лівою кнопкою. При цьому на екрані з'являється вікно завдання параметрів котушки. У вікні, що з'явилося, задайте наступні параметри магнітної лінзи:

| № п/п | Параметр магнітної лінзи | Орієнтовні значення |
|----------|--------------------------|---------------------|
| 1. | Радіус котушки | 10÷20 мм. |
| 2. | Кількість витків | 200÷1000 вит. |
| 3. | Діелектрична проникність | 1 |
| 4. | Величина струму | 20÷200 мА |

Після завдання параметрів клацніть «мишкою» на кнопці «ОК».

Виберіть за допомогою маніпулятора «миша» з головного меню програми режим завдання параметрів вльоту електрона «SETUP-е» і клацніть лівою

кнопкою. При цьому на екрані з'являється відповідне вікно, в якому потрібно задати наступні параметри.

| № п/п | Параметри вльоту електрона | Орієнтовні значення |
|----------|-------------------------------------|---------------------|
| 1. | Прискорююча напруга | 100÷500 В |
| 2. | Видалення точки вльоту від осі поля | 1÷3 мм |
| 3. | Кут вльоту | 0 |

Після завдання параметрів вльоту електрона клацніть «мишкою» на кнопці «ОК». У головному меню програми клацніть мишкою на кнопці «Графік». Результати розрахунку відображаються на екрані монітора. Підберіть таку швидкість вльоту електрона, щоб він зробив два повних обороти при русі в полі соленоїда. Отримані результати занесіть в протокол роботи. Поясніть фізику процесу руху електрона в однорідному магнітному полі соленоїда.

2.5.2. Змініть в 2 рази кількість витків соленоїда. Виконайте розрахунок і занесіть результати в протокол. Поясніть отримані результати.

2.5.3. Змініть в 2 рази в порівнянні з початковими параметрами (п.2.5.1.) величину радіуса котушки. Виконайте розрахунок і занесіть результати в протокол. Поясніть отримані результати.

2.5.4. Змініть в 2 рази в порівнянні з початковими параметрами (п.2.5.1.) величину струму котушки. Виконайте розрахунок і занесіть результати в протокол. Поясніть отримані результати.

2.5.5. Змініть в 2 рази в порівнянні з початковими параметрами (п.2.5.1.) величину прискорюючого напруження. Виконайте розрахунок і занесіть результати в протокол. Поясніть отримані результати.

2.5.6. Змініть напрям струму в соленоїді. Параметри соленоїда і параметри вльоту електрона повинні відповідати п. 2.5.1. Виконайте розрахунок і занесіть результати в протокол. Поясніть отримані результати.

2.6. Дослідження руху електрона в неоднорідному аксіально-симетричному полі короткої магнітної лінзи.

2.6.1. Виберіть у вікні управління режим дослідження руху електрона в неоднорідному аксіально-симетричному полі короткої котушки. Для цього видалите за допомогою маніпулятора «миша» хрестик у віконці поруч з написом «довга котушка». Виберіть за допомогою маніпулятора «миша» з головного меню програми режим завдання параметрів котушки «SETUP-B» і клацніть лівою кнопкою. При цьому на екрані з'являється вікно завдання параметрів котушки. У вікні, що з'явилося, задайте наступні параметри магнітної лінзи:

| № п/п | Параметр магнітної лінзи | Орієнтовні значення |
|----------|--------------------------|---------------------|
| 1. | Радіус котушки | 10÷20 мм. |
| 2. | Кількість витків | 50÷250 |
| 3. | Діелектрична проникність | 1 |
| 4. | Величина струму котушки | 20÷200 мА |

Після завдання параметрів клацніть «мишкою» на кнопці «ОК».

Виберіть за допомогою маніпулятора «миша» з головного меню програми режим завдання параметрів вльоту електрона «SETUP-e» і клацніть лівою кнопкою. При цьому на екрані з'являється відповідне вікно, в якому потрібно задати наступні параметри.

| № п/п | Параметри вльоту електрона | Орієнтовні значення |
|----------|--------------------------------------|---------------------|
| 1. | Прискорююча напруга | 100÷500 В |
| 2. | Віддалення точки вльоту від осі поля | 1÷3 мм |
| 3. | Кут вльоту | 0 |

Після завдання параметрів вльоту електрона клацніть «мишкою» на кнопці «ОК».

У головному меню програми клацніть мишкою на кнопці «Графік». Результати розрахунку відображаються на екрані монітора. Підберіть максимальну швидкість вльоту електрона, щоб його траєкторія перетнула вісь **Z** в межах дії поля лінзи. Отримані результати занесіть в протокол роботи. Поясніть фізику процесу руху електрона в неоднорідному магнітному полі короткої магнітної лінзи.

2.6.2. Змініть в 2 рази кількість витків котушки в порівнянні з початковими параметрами (п. 2.6.1.). Виконайте розрахунок і занесіть результати в протокол. Поясніть отримані результати.

2.6.3. Змініть в 2 рази в порівнянні з початковими параметрами (п. 2.6.1.) величину радіуса котушки. Виконайте розрахунок і занесіть результати в протокол. Поясніть отримані результати.

2.6.4. Змініть в 2 рази в порівнянні з початковими параметрами (п. 2.6.1.) величину струму котушки. Виконайте розрахунок і занесіть результати в протокол. Поясніть отримані результати.

2.6.5. Змініть в 2 рази в порівнянні з початковими параметрами (п. 2.6.1.) величину прискорюючої напруги. Виконайте розрахунок і занесіть результати в протокол. Поясніть отримані результати.

2.6.6. Змініть напрям струму в котушці. Параметри котушки і параметри вльоту електрона повинні відповідати п. 2.6.1. Виконайте розрахунок і занесіть результати в протокол. Поясніть отримані результати.

2.7. Контрольні питання.

1. Чому траєкторія електрона в магнітному полі не може бути плоскою кривою?
2. Яким чином можна визначити розподіл індукції на осі аксіально-симетричного магнітного поля?
3. При якій умові соленоїд може створити однорідне аксіально-симетричне магнітне поле?
4. У чому суть розрахункового методу визначення траєкторії електрона в аксіально-симетричному магнітному полі?
5. Які параметри характеризують початкові умови вльоту електрона в поле магнітної лінзи, що моделюється?
6. Від чого залежить фокусна відстань магнітної лінзи?
7. Чому магнітні електронні лінзи завжди фокусують пучок параксіальних електронів?

2.8. Зміст протоколу роботи.

1. Мета і задачі практичної роботи.
2. Дати короткий опис методів визначення магнітних полів, що використовуються і траєкторій електронів.
3. Результати розрахунку розподілу індукції на осі магнітного поля лінзи, параметри якої задані викладачем.
4. По кожному пункту програми занести в протокол початкові дані і результати розрахунку. Представити аналіз отриманих результатів.
5. Висновки по роботі.
6. Дайте письмові відповіді на контрольні питання.

Література:

1. Шерстнев Л.Г. Электронная оптика и электронно-лучевые приборы. – М.: Энергия, 1971.
2. Жигарев А.А. Электронная оптика и электронно-лучевые приборы. - М.: Высш. шк., 1972.

ЗМІСТ

Стор.

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | Дослідження руху електрона в осі-симетричних електростатичних полях. | 4 |
| 1.1 | Теоретичні положення. | 4 |
| 1.1.1. | Розподіл потенціалу в осі-симетричному електричному полі. | 4 |
| 1.1.2. | Рух параксіальних електронів в осі-симетричному електричному полі. | 6 |
| 1.2. | Програмне забезпечення курсової роботи. | 8 |
| 1.3. | Програма курсової роботи. | 10 |
| 1.3.1 | Розрахунок електростатичного поля електронної лінзи за методом кінцевих різниць. | 10 |
| 1.3.2. | Дослідження руху електрона в осі – симетричних електростатичних полях електронних лінз. | 12 |
| 1.3.3. | Контрольні питання. | 17 |
| 1.3.4. | Зміст протоколу роботи. | 17 |
| 2. | Дослідження процесів руху електрона в осі-симетричному полі магнітних електронних лінз. | 17 |
| 2.1. | Загальні положення. | 18 |
| 2.2. | Рух електрона в однорідному осі-симетричному магнітному полі. | 20 |
| 2.3. | Рух електрона в неоднорідному аксіально-симетричному магнітному полі. | 21 |
| 2.4. | Програмне забезпечення. | 22 |
| 2.5. | Дослідження руху електрона в однорідному аксіально-симетричному полі соленоїда. | 23 |
| 2.6. | Дослідження руху електрона в неоднорідному аксіально-симетричному полі короткої магнітної лінзи. | 24 |
| 2.7. | Контрольні питання. | 26 |
| 2.8. | Зміст протоколу роботи. | 26 |
| | Література | 26 |